Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 16, No. 4, Winter. 2019, p. 723-741

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۶، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۷، ص. ۷۴۱-۷۲۳

پایش عملکرد گندم و چغندرقند در استان خراسان: ۱- تجزیه و تحلیل روش‌های پیش‌بینی عملکرد پتانسیل

مهدی نصیری محلاتی[1*]- علیرضا کوچکی[1]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۲۴
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۲۰

چکیده

پیش‌بینی عملکرد پتانسیل در شرایط بدون محدودیت آب و عناصر غذایی و عاری از آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز اولین قدم در تخمین خلاء عملکرد محصولات زراعی است. عدم دسترسی به داده‌های کامل و دقیق محدودیت اصلی در استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی برای برآورد عملکرد پتانسیل است و در این‌صورت استفاده از مدل‌های ساده شده جایگزین مناسبی محسوب می‌شود، البته پیش از استفاده از این مدل‌های ساده اطمینان از قدرت پیش‌بینی آنها در مقایسه با مدل‌های شبیه‌سازی ضروری می‌باشد. در این پژوهش عملکرد پتانسیل گندم و چغندرقند در سه منطقه از استان خراسان رضوی (تربت حیدریه، مشهد و نیشابور) با استفاده از سه روش ساده محاسباتی و نیز با دو مدل شبیه‌سازی برآورد و دقت روش‌ها مورد مقایسه قرار گرفته است. محاسبات ساده بر اساس روش فائو (FAO)، مدل تغییر یافته فائو (FAO-M) و روشی مبتنی بر کارآیی مصرف نور (RUE) انجام شد که در آنها عملکرد پتانسیل به‌وسیله دو معادله و با استفاده از میانگین ماهانه داده‌های آب و هوایی برآورد می‌شود. عملکرد پتانسیل دو محصول در همان مناطق توسط مدل‌های LINTUL و SUCROS که بر اساس داده‌های روزانه آب و هوایی اجرا می‌شوند و قبلاً برای مطالعات در مقیاس منطقه‌ای واسنجی شده بودند نیز پیش‌بینی شد و قدرت پیش‌بینی ۵ روش بر اساس شاخص‌های آماری مورد مقایسه قرار گرفت. میانگین عملکرد مشاهده شده گندم در سه منطقه تحت بررسی ۷/۱۸ تن در هکتار بود و در ۵ روش تحت بررسی میانگین عملکرد پتانسیل گندم سه منطقه بین ۶/۹۲ تا ۷/۶۳ تن در هکتار پیش‌بینی شد. بر این اساس خطای پیش‌بینی در مورد مدل‌های شبیه‌سازی ۱/۳۹ و برای سه روش ساده کمتر از ۵ درصد (۴/۶۴ ٪) به‌دست آمد. باوجودی‌که مقدار نسبی جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE_n$) برای سه روش ساده بیشتر از مدل‌های شبیه‌سازی بود ولی بین ۷/۱۱ تا ۱۰/۱۶ درصد و در محدوده مطلوب قرار داشت. به‌علاوه کارآیی مدل‌سازی (ME) نیز مثبت و به‌جز در روش RUE بالاتر از ۰/۶۰ بود. میانگین عملکردهای اندازه‌گیری شده چغندرقند ۸۲/۵ تن در هکتار بود در حالی‌که میانگین عملکرد پتانسیل پیش‌بینی شده به روش‌های مختلف در محدوده ۹۱-۸۹ تن در هکتار قرار داشت. دقت پیش‌بینی عملکرد چغندر به‌وسیله روش‌های ساده کمتر از مدل‌های شبیه‌سازی بود ولی قابلیت پیش‌بینی آنها بر اساس شاخص‌های آماری قابل قبول محسوب شد به‌طوری‌که $RMSE_n$ محاسبه شده برای این روش‌ها از ۱۱/۵ درصد تجاوزر نکرد. در تعیین اعتبار متقابل روش‌های ساده با مدل‌های شبیه‌سازی نیز همبستگی معنی‌داری بین عملکردهای پیش‌بینی شده توسط روش‌های ساده و مدل‌های پیچیده به‌دست آمد که نشان‌دهنده انطباق مطلوب آنهاست. نتایج این تحقیق نشان داد که با استفاده از روش‌های محاسباتی ساده و حداقل داده‌های آب و هوایی می‌توان عملکرد پتانسیل محصولات زراعی را با دقت قابل قبولی برآورد کرد. چنین روش‌هایی در صورت عدم دسترسی به مدل‌های شبیه‌سازی که به‌طور دقیق واسنجی شده باشند و در اختیار نداشتن داده‌های کامل آب و هوایی روزانه جهت تخمین خلاء عملکرد در مقیاس منطقه‌ای و نیز در پهنه‌بندی‌های اگرواکولوژیک مفید خواهند بود.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی عملکرد، کارآیی مدل‌سازی، مدل‌های خلاصه، مدل‌های شبیه‌سازی

مقدمه

چنانچه گیاهان زراعی در شرایطی بدون وجود محدودیت عوامل غیر زنده (آب، عناصر غذایی و آلاینده‌ها) و عوامل زنده (آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز) قرار گیرند عملکرد آنها توسط میزان تشعشع خورشیدی، درجه حرارت، غلظت دی اکسید کربن و خصوصیات ژنتیکی ارقام تعیین می‌شود. این عملکرد اصطلاحاً به عملکرد بالقوه (پتانسیل[2]) موسوم است (van Ittersum *et al.*, 2003) و بدیهی است که برای یک گونه زراعی مشخص در مناطق

۱- استاد، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول : Email: mnassiri@um.ac.ir)

DOI: 10.22067/gsc.v16i4.62556

2- Potential yield

مختلف متفاوت خواهد بود. در برنامه‌ریزی‌های تولید محصولات زراعی آگاهی از میزان عملکرد بالقوه و تفاوت آن با عملکرد واقعی یعنی محصول واقعی قابل برداشت از مزارع که نشان‌دهنده خلاء عملکرد[1] می‌باشد بسیار مفید خواهد بود (Licker *et al*., 2010). در واقع خلاء عملکرد تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل زنده و غیر زنده محیطی به‌وجود می‌آید که از طریق پایش[2] قابل تخمین می‌باشند (Caldiz *et al*., 2002). بر این اساس در صورت پیش‌بینی عملکرد بالقوه، پایش عملکرد و کمی کردن تأثیر عوامل محیطی مؤثر بر آن، عملکرد واقعی و خلاء عملکرد برآورد خواهند شد. در نهایت با تجزیه و تحلیل خلاء عملکرد امکان ارائه راهکارهای اجرایی برای پر کردن این خلاء و نزدیک کردن عملکرد واقعی به عملکرد بالقوه فراهم می‌گردد. (Kropff *et al*., 2001; Bhatia *et al*., 2008). کالدیز و همکاران (Caldiz *et al*., 2002) در بررسی جامعی چارچوبی را برای آنالیز خلاء عملکرد در مقیاس وسیع ارائه کردند. اساس این روش پیش‌بینی عملکرد پتانسیل و مقایسه آن با عملکرد واقعی است. بنابراین برآورد عملکرد پتانسیل اولین گام در تجزیه و تحلیل خلاء عملکرد می‌باشد.

برآورد عملکرد بالقوه مستلزم کاشت ارقام مختلف گیاهان زراعی در آزمایشات مکرر در مناطقی با شرایط اقلیمی مختلف و در عین حال ایجاد شرایط کاملاً مطلوب برای رشد و نمو گیاه می‌باشد و بدیهی است که اجرای این نوع پژوهش‌ها از نظر زمانی طولانی و بسیار پرهزینه می‌باشد. مدل‌های شبیه‌سازی ابزار بسیار قوی جهت پیش‌بینی عملکرد محصولات زراعی در شرایط مختلف محیطی هستند. افزایش قابلیت‌های مدل‌های رشد باعث شده تا از این مدل‌ها در مقیاس‌های مختلف برای پیش‌بینی عملکرد استفاده شود. در واقع مدل‌های پیشرفته شبیه‌سازی رشد قادرند تا نوسانات عملکرد را در سطح مزرعه (Batchelor *et al*., 2002)، منطقه (Jagtap and Jones 2002; Kiniry *et al*., 2004)، کشور (Priya and Shibasaki, 2001) و یا حتی در مقیاس جهانی (Stehfest *et al*., 2007) پیش‌بینی کنند. این مدل‌ها در ایران نیز در مطالعات مختلف در سطح ملی و منطقه‌ای با نتایج مطلوب به‌کار برده شده‌اند (Koocheki *et al*., 2006; Nassiri Mahallati *et al*., 2006; Soltani *et al*., 2001).

علی‌رغم کاربردهای بسیار وسیع مدل‌های شبیه‌سازی در مطالعات مختلف و در مقیاس‌های متفاوت از کرت تا منطقه یا حتی جهانی، قابلیت پیش‌بینی آنها به شدت تابع داده‌های ورودی است. لذا در شرایطی که داده‌های آب و هوایی و گیاهی مورد نیاز برای اجرای مدل در اختیار نباشد پیش‌بینی مدل‌ها به میزان قابل توجهی با مقادیر مشاهده شده، حتی در شرایط پتانسیل تفاوت خواهد داشت (Boote *et al*.,1996; Hoogenboom *et al*.,1996). به‌علاوه واسنجی (کالیبراسیون) و تعیین اعتبار این مدل‌ها به داده‌های دقیق آزمایشی نیاز دارد. موچو وکراپف (Muchow and Kropff, 1997) بیان داشتند که حتی مدل‌های بسیار قوی نیز بدون وجود داده‌های دقیق حاصل از آزمایشات مزرعه‌ای جهت تعیین پارامترها و سنجش اعتبار پیش‌بینی، قابلیت مطلوبی در برآورد عملکرد بالقوه ندارند. بنابراین در صورت عدم دسترسی به داده‌های دقیق و صحیح استفاده از محاسبات پیچیده ریاضی به‌کار رفته در مدل‌های رشد چندان سودمند نخواهد بود.

عدم دسترسی به داده‌های کامل و صحیح از مهمترین مشکلات محققین کشور هنگام استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی در برآورد عملکرد بالقوه، خلاء عملکرد و نیز در مطالعات مربوط به پهنه‌بندی می‌باشد. در چنین شرایطی به‌کارگیری مدل‌های ساده شده[3] که در آنها الگوریتم محاسباتی مدل‌های رشد در قالب دو یا چند معادله ساده ارائه می‌شود راهکاری جایگزین محسوب می‌شود (Brooks and Tobias, 1999). نمونه‌ای از این روش‌های ساده توسط فائو برای برآورد عملکرد پتانسیل در پهنه‌بندی‌های اگرواکولوژیکی ارائه شده است (FAO, 1981; FAO, 1978). البته نحوه انجام محاسبات در این مدل‌های خلاصه شده در ایران کمتر مورد توجه قرار گرفته و موارد کاربرد آن‌ها توسط محققین کشور بسیار محدود است.

در این تحقیق عملکرد بالقوه دو محصول مهم استان خراسان یعنی گندم (*Triticum aestivum*) به‌عنوان محصولی زمستانه و دانه‌ای و چغندرقند (*Beta vulgaris*) به‌عنوان گیاهی بهاره و ریشه‌ای در شرایط بدون محدودیت به نحوی که تنها میزان تشعشع خورشیدی و درجه حرارت تعیین‌کننده عملکرد باشند با استفاده از چند روش محاسباتی ساده و نیز به‌وسیله مدل‌های شبیه‌سازی پیش‌بینی شده و قابلیت روش‌های ساده نسبت به مدل‌های پیچیده مورد مقایسه و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه سه روش محاسباتی ساده برای برآورد عملکرد پتانسیل گندم و چغندرقند به‌کار رفته است، در هر سه روش فرض بر این است که رشد محصولات زراعی الگویی سیگموئیدی داشته و دارای سه مرحله متمایز شامل رشد کند اولیه (رشد نمایی[4])، رشد خطی[5] و در نهایت ثابت شدن تجمع ماده خشک می‌باشد. رشد نمایی و خطی به‌ترتیب ۴۵ و۴۰ درصد از کل دوره رشد را شامل می‌شود و در ۱۵ درصد باقی‌مانده، سرعت رشد کند شده و به صفر می‌رسد. با

1- Yield gap
2- Monitoring

3- Summary model
4- Exponential growth
5- Linear growth

این فرضیات محاسبات مربوط به سه روش به شرح زیر است.

برآورد عملکرد بالقوه به روش فائو

در این روش که توسط فـائو بـرای استفاده در پهنـه‌بنـدی‌هـای اگرواکولوژیکی محصولات زراعی ارائه شـده (FAO, 1978; FAO, 1981) سرعت رشد در مرحله خطـی (LGR، کیلـوگرم در هکتـار در روز) و کل ماده خشک تولیـد شـده (TDM، کیلـوگرم در هکتـار) در شرایط پتانسیل از معادلات ۱ و ۲ به‌دست می‌آید:

$$LGR = \frac{0.72 \times GPHOT}{(1 + 0.25 \times C_i \times p)} \quad (۱)$$

$$TDM = \frac{0.36 \times GPHOT}{(\frac{1}{p} + 0.25 \times C_i)} \quad (۲)$$

در این معادلات GPHOT میـانگین سـرعت فتوسـنتز ناخـالص کانوپی (کیلوگرم گلوکز در هکتـار در روز) p طـول دوره رشـد (روز) و C_i ضریب تنفس نگهداری[1] است و مقادیر ثابت این معادلات مربـوط به تنفس رشد[2] و تصحیح ضریب تنفس نگهـداری مـی‌باشـد. مقـدار GPHOT در هر سـطحی از تشعشـع روزانـه خورشـیدی از شـکل ۱ قرائت می‌شود. در این شکل مقدار GPHOT براساس حداکثر سرعت فتوسنتز ناخالص برگ در شرایط اشباع نوری[3] (Fg، کیلوگرم CO_2 در هکتار در ساعت) برآورد شده است و بـرای اسـتفاده از آن ابتـدا بایـد مقدار Fg معلوم باشد.

سرعت فتوسنتز برگ علاوه بر گونه گیاهی تابعی از درجه حرارت نیز می‌باشد و در واقع Fg، حداکثر سرعت فتوسنتز تک برگ در درجه حرارت‌های مختلف اسـت. در شـکل ۲ مقـدار Fg بـرای گـروه‌هـای مختلف محصولات زراعی در دامنه وسیعی از درجه حرارت ارائه شـده است، بر اساس این شکل در دمای ۲۰ درجه سـانتی‌گـراد مقـدار Fg برای چغندرقند معادل ۴۰ کیلوگرم CO_2 در هکتار در ساعت می‌باشد. با مراجعه به مقادیر سمت راست شکل ۱ مقـدار GPHOT چغندرقنـد در تشعشع روزانه ۲۰ مگاژول در متر مربع معادل ۴۲۰ کیلوگرم گلوکز در هکتار در روز به‌دست خواهد آمد.

C_i تابع درجه حرارت بوده و مقدار آن برای گونه‌های لگوم و غیـر لگوم از شکل ۳ استخراج می‌شود.

برآورد عملکرد بالقوه با روش تغییریافته فائو

در ایـن روش کـه مـدل خلاصـه شـده ورسـتیخ و ون کیـولن (Versteeg and van Keulen, 1986) مـی‌باشـد و نـوع تغییریافتـه روش فائو محسوب می‌شود کـل مـاده خشـک تولیـد شـده (TDM، کیلوگرم در هکتار) از معادله ۳ به‌دست می‌آید:

$$TDM = 2500 + DM_L + DM_F \quad (۳)$$

که در آن ۲۵۰۰ میزان ماده خشک تولید شـده در مرحلـه نمـایی (کیلوگرم در هکتار)، DM_F و DM_L به‌ترتیب ماده خشـک تولیـدی در مراحل خطی و نهایی (کیلوگرم در هکتار) می‌باشـند. بنـابراین مقـدار TDM با جای‌گذاری DM_L و DM_F از معادله ۴ به‌دست می‌آید:

$$TDM=2500+(0.4\times p\times LGR)+(0.15\times p\times 0.5\times LGR) \quad (۴)$$

که در آن LGR سرعت رشد در مرحله خطی (کیلوگرم در هکتـار در روز) p طـول دوره رشـد (روز) مـی‌باشـد. ضـرایب ۰/۴ و ۰/۱۵ به‌ترتیب نشان‌دهنده سهم دوره رشد خطی و رشد نهـایی از کـل دوره رشد بوده و سرعت رشد در مرحله نهایی نصف LGR در نظـر گرفتـه شده است. معادله ۴ را پس از ساده شدن می‌توان به‌صورت معادلـه ۵ بازنویسی کرد:

$$TDM = 2500 + (0.475 \times p \times LGR) \quad (۵)$$

در صورت عدم دسترسی به داده‌های آزمایشـی، سـرعت رشـد در مرحله خطی از معادله ۶ برآورد می‌شود:

$$LGR = GPHOT\times (1 - C_m \times C_p) \times E_c \times C_L \quad (۶)$$

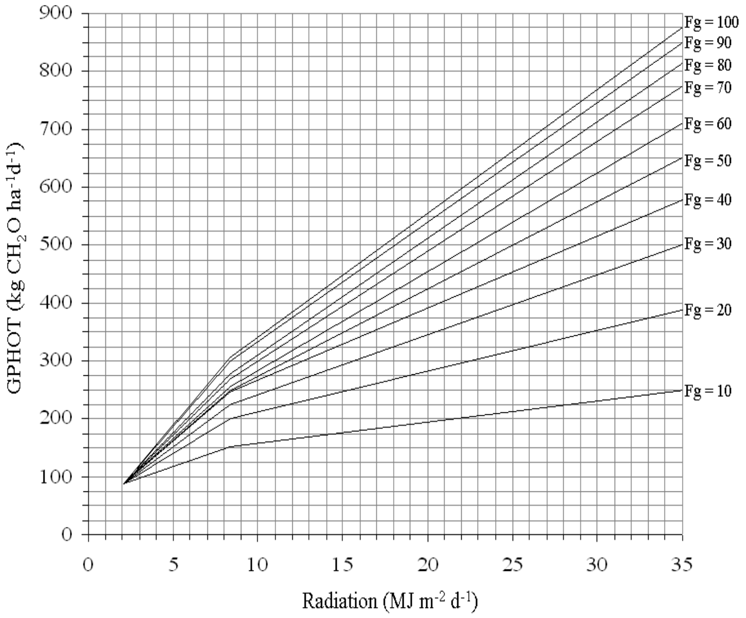
GPHOT میانگین سرعت فتوسـنتز ناخـالص کـانوپی (کیلـوگرم گلوکز در هکتار در روز) می‌باشد که نحوه به‌دسـت آوردن آن قـبلاً در روش فائو توصیف شد. C_m ضریب تنفس نگهداری (کیلـوگرم گلـوکز به‌ازای کیلوگرم ماده خشـک) در طـی دوره رشـد خطـی اسـت، ایـن ضریب تابع درجه حرارت بوده و مقدار آن برای میانگین درجه حرارت در طـی دوره رشـد خطـی و بـر حسـب سـرعت تـنفس نگهـداری محصولات مختلف از شکل ۴ به‌دست می‌آید.

برای استفاده از شکل ۴ ابتـدا بایـد مقـدار R_m را بسـته بـه نـوع محصول تحت بررسی از جدول ۱ مشخص ساخت برای مثـال مقـدار R_m برای چغندرقند معادل ۰/۰۱ کیلوگرم گلوکز به ازای کیلوگرم ماده خشک در روز می‌باشد. در شکل ۴ مقدار C_m چغندرقنـد از منحنـی ۱ قرائت می‌شود و در دمای ۲۲ درجه سانتی‌گراد (۲ درجـه سـانتی‌گـراد بالاتر از دمای مرجع) برابر با ۰/۲۰ خواهد بود.

C_p ضریب تصحیح تنفس نگهداری برای شرایطی است که طول دوره رشد خطی بیشتر یا کمتر از طـول اسـتاندارد ایـن دوره (۴۶ روز) باشد. مقدار این ضریب از شکل ۵ به‌دست می‌آید.

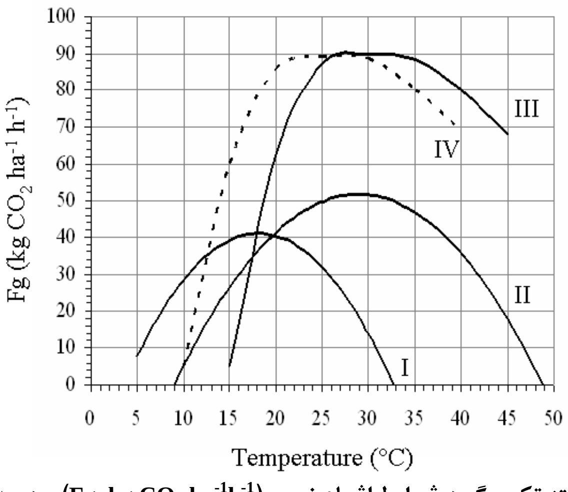
E_c ضریب تبدیل گلوکز به ماده خشک می‌باشد و مقدار آن بـرای محصولات مختلف در جدول ۱ ارائه شده است. C_L ضریب تصـحیح مربوط به بسته بودن کامل کانوپی در طی رشد خطی است، مقدار آن در LAI=۵ برابر یک، در LAI=۴ معادل ۰/۹ و در LAI=۳، ۰/۷ بـوده و میانگین آن برای استفاده در معادله ۳ برابر ۰/۹۵ می‌باشد.

1- Maintenance respiration
2- Growth respiration
3- Light saturated leaf photosynthesis rate



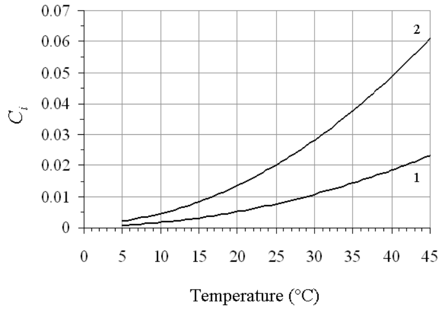
شکل ۱- سرعت فتوسنتز ناخالص روزانه (GPHOT, kg CH_2O $ha^{-1}d^{-1}$) برای کانوپی بسته (دوره رشد خطی) به‌عنوان تابعی از حداکثر سرعت فتوسنتز تک برگ در اشباع نوری (Fg, kg CO_2 $ha^{-1}h^{-1}$) و میزان تشعشع روزانه (MJ $m^{-2}d^{-1}$) در عرض‌های جغرافیایی بین صفر تا ٤٠ درجه

Figure 1- Daily gross photosynthesis rate (GPHOT, kg CH_2O $ha^{-1}d^{-1}$) for closed canopy (linear growth period) as function of maximum photosynthesis rate of single leaf at light saturation (Fg, kg CO_2 $ha^{-1}h^{-1}$) and daily radiation (MJ $m^{-2}d^{-1}$) in latitudes between 0-40. Source: Versteegand van Keulen, 1986.



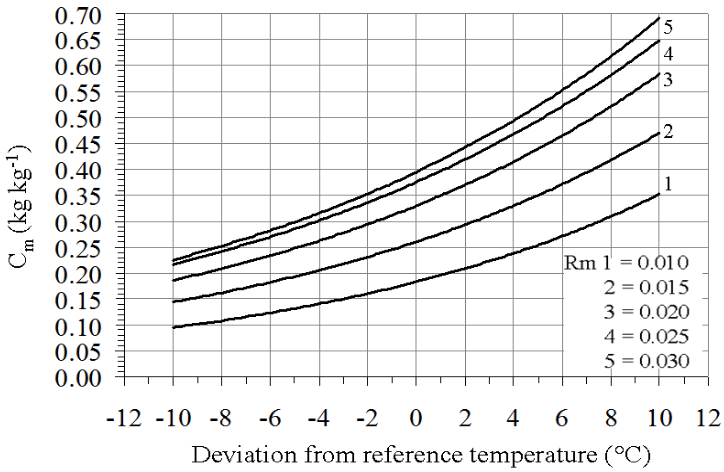
شکل ۲- رابطه بین حداکثر سرعت فتوسنتز تک برگ درشرایط اشباع نوری (Fg, kg CO_2 $ha^{-1}h^{-1}$) و درجه حرارت در چهار گروه از گیاهان زراعی: I) گونه‌های C3 مناطق معتدله (گندم، جو، سیب زمینی، چغندرقند)،II) گونه‌های C3 مناطق گرم (برنج، سویا، پنبه، کاساوا)، III) گونه‌های C4 (ذرت، سورگوم، ارزن، نیشکر)، IV) واریته‌هایی از گونه‌های C4 (ذرت، سورگوم) که به دمای پایین سازگار هستند، Fg در این گروه مشابه گروه III ولی در دمای 5° C پایین‌تر است.

Figure 2- Relation between maximum photosynthesis rate of single leaf at light saturation (Fg, kg CO_2 $ha^{-1}h^{-1}$) and temperature in 4 groups of crop species: I) Temperate C3 species (wheat, barley, potatoes, sugar beet), II) Warm climate C3 species (rice, soybean, cotton, cassava), III) C4 species (corn, sorghum. millet, sugarcane) IV) cultivars of C4 species (corn, sorghum) adapted to lower temperature, Fg is the same as group III but in 5 C° lower temperature. Versteeg and van Keulen, 1986



شکل ۳- رابطه بین ضریب تنفس نگهداری (C_i در معادلات ۱ و ۲) و میانگین درجه حرارت در طی فصل رشد برای ۱) گونه‌های غیر بقولات و ۲) گونه‌های بقولات

Figure 3- Relation between coefficient of maintenance respiration (C_i in Equations 5 and 6) and average growth period temperature for 1) non-leguminous species and b) leguminous species. Source: Versteeg and van Keulen, 1986



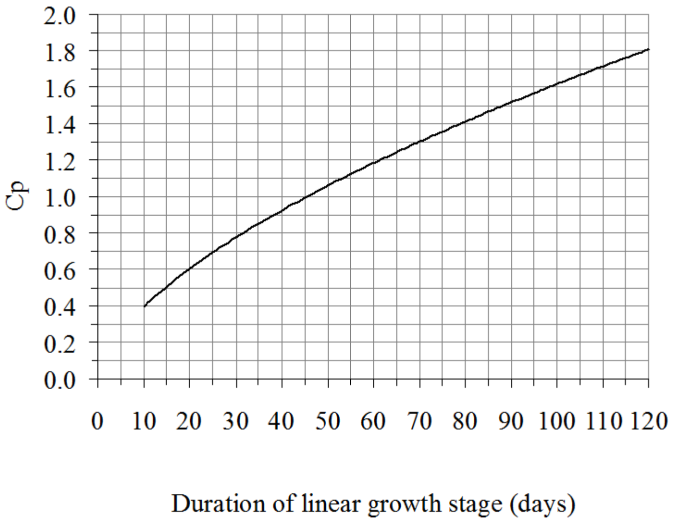
شکل ٤- تصحیح ضریب تنفس نگهداری (C_m, kg kg^{-1}) بر اساس تغییر درجه حرارت نسبت به دمای مرجع (ref) در طی دوره رشد خطی ٤٦ روزه برای ۵ گروه از گیاهان زراعی (جدول ۱) با مقادیر مختلف سرعت تنفس روزانه (R_m, kg CH_2O kg DM^{1} d^{-1})، دمای مرجع برای گونه‌های C3 و C4 به‌ترتیب ۲۰ و ۳۰ °C می‌باشد.

Figure 4- Correction of maintenance respiration coefficient (C_m, kg kg^{-1}) for deviation from reference temperature (ref) during linear growth period (46 days) in 5 groups of crop species (Table 1) with different daily respiration rates (R_m, kg CH_2O kg DM^{-1} d^{-1}), reference temperature for C3 and C4 species is 20 and 30 °C, respectively. Source: Versteeg and van Keulen, 1986

جدول ۱- سرعت تنفس نگهداری (R_m, kg CH_2O kg DM^{-1}d^{-1}) و ضریب تبدیل گلوکز به ماده خشک (E_c, kg DM kg^{-1} CH_2O) در دمای مرجع (به‌ترتیب ۲۰ و ۳۰ °C برای گیاهان زراعی معتدله و گرمسیری)

Table 1- Maintenance respiration rate (R_m, kg CH_2O kg DM^{-1}d^{-1}) and conversion efficiency (E_c, kg DM kg^{-1} CH_2O) at reference temperature (20 and 30 °C for temperate and tropical species, respectively). Source: Versteeg and van Keulen, 1986

نوع محصول Crop group	R_m	E_c
گیاهان ریشه‌ای/غده ای Root/tuber crops	0.010	0.75
غلات Cereals	0.015	0.70
دانه‌های پروتئینی Protein-rich seed crops	0.025	0.65
دانه‌های روغنی Oil-rich seed crops	0.030	0.50



شکل ۵- ضریب C_p برای تصحیح ضریب تنفس نگهداری (C_m) در مقادیر مختلف طول دوره رشد خطی، مقدار C_p در رشد خطی ٤٦ روزه برابر ۱ است.

Figure 5- C_p factor for correction of maintenance respiration coefficient (C_m) at different durations of linear growth period, C_p is equal 1 for liner growth period of 46days. Source: Versteeg and van Keulen, 1986.

بـه‌طـور خلاصـه در روش فـائو و روش تغییریافتـه فـائو (روش ورستیخ و ون کیولن) سـرعت رشـد در مرحلـه خطـی و مقـدار مـاده خشک تولیدشده در شرایط پتانسیل را مـی‌تـوان بـا دو معادلـه سـاده برآورد کرد. داده‌های لازم برای اجـرای روش فـائو طـول دوره رشـد (تعداد روز از سبز شدن تا رسیدگی)، میانگین درجه حرارت و تشعشـع روزانه در طی دوره رشد خطی است. برای اجرای روش تغییریافته فائو نیز برای هر محصول به داده‌های طـول دوره رشـد، میـانگین درجـه حرارت (°C) و میانگین روزانه تشعشـع خورشـیدی ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$) در طی دوره رشد خطی نیاز می‌باشد.

برآورد عملکرد بالقوه بر اساس کارآیی مصرف نور

در مدل‌های پیشرفته رشد، محاسبه میـزان تشعشـع جـذب شـده روزانه مستلزم شبیه‌سازی کسری از تشعشع روزانـه (F_{abs}) اسـت کـه به‌وسیله برگ‌ها جذب می‌شود، F_{abs} معمولاً بر اساس ضریب خاموشی نور و پیش‌بینی رشد روزانه شاخص سطح برگ برآورد مـی‌شـود. نـان هبل (Nonhebel, 1997) روش ساده‌ای را به‌عنوان جـایگزین ارائـه کرد که در آنتولید ماده خشک از حاصلضرب میزان تشعشع جذب‌شـده در کارآیی مصرف نور[1] (RUE) به‌دست می‌آید. در این روش فرض بر این است که F_{abs} از سبز شدن تا زمان بسته شـدن کـانوپی بصـورت خطی افزایش یافته و از صفر به ۱ می‌رسد، در طی دوره رشـد خطـی معادل ۱ بوده و از پایان این دوره تا زمان رسیدگی بـه‌صـورت خطـی کاهش یافته و مجدداً به صفر خواهد رسید (شکل ۶). این الگو تقریبـاً در تمام گیاهان زراعی مشاهده مـی‌شـود البتـه در محصـولاتی نظیـر چغندرقند که در زمان برداشت هنوز کـانوپی بسـته‌ای دارنـد، کـاهش F_{abs} صورت نمی‌گیرد. در روش نان هبل سرعت رشد در مرحله خطی (LGR، کیلوگرم در هکتـار در روز) و کـل مـاده خشـک تولیـد شـده (TDM، کیلوگرم در هکتار) از معادلات ۷ و ۸ برآورد می‌شوند:

$$LGR = RUE \times I_{abs} \times 10 \qquad (۷)$$

$$TDM = \sum I_{abs} \times RUE \times 10 \qquad (۸)$$

در این معادلات RUE کارایی مصرف نـور (گـرم بـر مگـاژول) و I_{abs} میزان تشعشع جذب (مگاژول در متـر مربـع در روز) مـی‌باشـند و عدد ۱۰ واحدها را به کیلوگرم در هکتار تبدیل می‌کند.

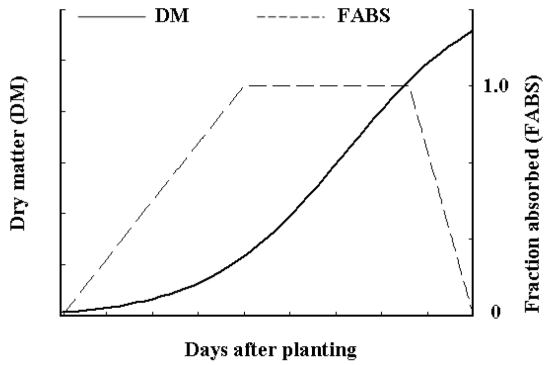
یادآوری می‌شود که در معادلـه ۷ I_{abs} معـادل تشعشـع روزانـه در بالای کانوپی است زیرا فرض بر این است که در مرحله رشـد خطـی F_{abs} برابر ۱ بوده (شکل ۶) و در نتیجه نور به‌طور کامل توسط کانوپی جذب می‌شود. در این روش نیز داده‌هـای مـورد نیـاز سـاده و شـامل گونه زراعی و میزان تشعشع روزانه است. در این مطالعه کارآیی RUE مصرف نور برای گندم ۱/۶۰ گرم بـر مگـاژول (O'Connell *et al.*, 2004; Nassiri Mahallati *et al.*, 2011) و برای چغندرقنـد ۱/۴۸ گرم بر مگاژول (Parsa, 2008; Richter *et al.*, 2001) منظور شده است.

در هر یک از سه مدل خلاصه شده فوق مقدار کل مـاده خشـک تولید شده در انتهای دوره رشد (TDM) در شـاخص برداشـت ضـرب می‌شود تا عملکرد ماده خشک به‌دست آیـد، شـاخص برداشـت بـرای

1- Radiation use efficiency

گندم ۰/۴۵ (Nassiri Mahallati and Koochki, 2017) و برای چغندرقند ۰/۸۵ (Parsa, 2008; Nonhebel, 1997) در نظر گرفته شد. در نهایت عملکرد دانه گندم بر اساس ۱۲ درصد رطوبت و عملکرد ریشه چغندرقند بر مبنای ۲۵ درصد ماده خشک محاسبه شد.

علاوه بر سه روش فائو، فائو تغییریافته و نان هبل که در ادامه به‌ترتیب روش FAO، FAO-M و RUE نامیده خواهند شد دو مدل استاندارد شبیه‌سازی رشد محصولات زراعی SUCROS و LINTUL نیز جهت برآورد عملکرد پتانسیل گندم و چغندرقند مورد استفاده قرار گرفت تا از این طریق بتوان قدرت پیش‌بینی روش‌های ساده را با مدل‌های پیچیده مقایسه کرد. مدل SUCROS (Van Laar *et al.*, 1997) تولید ماده خشک را بر اساس فتوسنتز ناخالص کانوپی و کسر کردن تنفس نگهداری و رشد از آن محاسبه می‌کند بنابراین با روش‌های FAO و FAO-M قابل مقایسه است در حالی‌که در مدل LINTUL (van Delden, 2001) ماده خشک بر اساس تشعشع جذب شده و کارآیی مصرف نور به‌دست می‌آید که با روش RUE مشابهت دارد. مدل‌های SUCROS و LINTUL قبلاً برای پیش‌بینی عملکرد گندم (Koocheki and Nassiri Mahallati, 2016; Mondani, 2012) و چغندرقند (Koocheki *et al*., 2006; Parsa, 2010) در شرایط پتانسیل برای استان خراسان واسنجی و تعیین اعتبار شده‌اند. لازم به ذکر است که مدل‌های SUCROS و LINTUL برای گندم بهاره طراحی شده‌اند و نیاز ورنالیزاسیون در آنها در نظر گرفته نشده است، در این تحقیق فرآیند ورنالیزاسیون به روش ارائه شده توسط کوچکی و نصیری محلاتی (Koocheki and Nassiri Mahallati, 2016) در هر دو مدل تعریف گردید.



شکل ٦- کسر تشعشع جذب شده (F_{abs}) توسط گیاهان زراعی در طی مراحل مختلف رشد زمان شروع و پایان دوره رشد خطی با پیکان نشان داده شده است.

Figure 6- Fraction of absorbed radiation (F_{abs}) by crops during different growth stages, arrows shows start and the end of linear growth phase

در ادامه عملکرد پتانسیل گندم در شهرستان‌های مشهد، تربت حیدریه و نیشابور و در مورد چغندرقند در شهرستان‌های مشهد، تربت حیدریه و فریمان به‌وسیله ۵ روش فوق برآورد گردید. لازم به ذکر است که این شهرستان‌ها بر مبنای دسترسی به مقادیر عملکرد در آزمایشات ایستگاهی و نیز عملکردهای ثبت شده از مزارع پر محصول در فاصله سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۸۸ انتخاب شدند. داده‌های هواشناسی (درجه حرارت و تعداد ساعات آفتابی) برای اجرای مدل‌ها از ایستگاه‌های هواشناسی شهرستان‌های تحت بررسی جمع‌آوری شد. برای اجرای مدل‌های شبیه‌سازی از داده‌های روزانه و در مدل‌های خلاصه شده از میانگین ماهانه استفاده شد. میزان تشعشع روزانه خورشیدی بر مبنای عرض جغرافیایی و با احتساب تعداد ساعات آفتابی به روش ارائه شده توسط خودریان وفان لار (Goudiraan and van Laar, 1993) برآورد گردید.

مقایسه روش‌های مختلف

داده‌های مورد نیاز برای تعیین اعتبار روش‌های پیش‌بینی عملکرد از نتایج آزمایشات اجرا شده در شرایط بهینه رشد برای گندم در ایستگاه‌های تحقیقاتی استان خراسان و نیز عملکردهای گزارش شده از مزارع رکوردگیری جمع‌آوری شد (زارع فیض آباد، مکاتبات شخصی).

جهت ارزیابی دقت روش‌های مختلفی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت مقادیر پیش‌بینی شده برای عملکرد پتانسیل گندم و چغندرقند توسط هر روش با عملکردهای مشاهده شده در آزمایشات ایستگاهی مقایسه شدند و اعتبار روش‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری تعیین گردید. میانگین اریبی[1] (MB) که میانگین تفاوت مقادیر پیش‌بینی شده (P_i) از مشاهدات (O_i) می‌باشد (معادله ۹) معیاری از

1- Mean bias

خطای مدل بوده و نزدیک بودن آن به صفر نشان‌دهنده دقت بیشتر در پیش‌بینی است.

$$MB = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i) \quad (۹)$$

جذر میانگین مربعات خطا[۱] (RMSE) که ازطریق معادله ۱۰ محاسبه می‌شود نیز از معیارهای رایج در تعیین اعتبار مدل‌ها می‌باشد (Loague and Green, 1991; Wilmot, 1982): که در آن O_i و P_i به‌ترتیب مشاهده iام و مقدار شبیه‌سازی شده آن، n تعداد مشاهدات است. RMSE (٪) نیز معیار دیگری است که در آن انحراف معیار خطای پیش‌بینی (RMSE) به‌عنوان درصدی از میانگین مشاهدات ($\bar{O}$) بیان می‌شود (معادله ۱۱) و بنابراین توصیف بهتری از قابلیت مدل را ارائه می‌کند. چنانچه مقدار RMSE (٪) کمتر از ۱۰درصد باشد شبیه‌سازی عالی، بین ۲۰-۱۰درصد خوب، بین ۳۰-۲۰درصد متوسط و بیشتر از ۳۰ درصد ضعیف خواهد بود (Jamieson *et al.*, 1991).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}} \quad (۱۰)$$

$$RMSE(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (۱۱)$$

کارآیی مدلسازی[۲] (ME) شاخص دیگری در ارزیابی اعتبار مدل‌هاست که تغییرات درون داده‌های شبیه‌سازی شده را با تغییرات موجود در داده‌های آزمایشی (مشاهدات) مقایسه می‌کند (معادله ۱۲). مقدار مطلوب ME معادل یک می‌باشد و مقادیر منفی نشان‌دهنده واریانس بیشتر در نتایج شبیه‌سازی نسبت به مشاهدات است (Loague and Green, 1991).

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2} \quad (۱۲)$$

برازش رگرسیون خطی بین مشاهدات و داده‌های شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با خط ۱:۱ از جمله رایج‌ترین و دقیق‌ترین روش‌های تعیین اعتبار مدل‌هاست (Soltani *et al.*, 2001; Nassiri Mahallati *et al.*, 2006). مدل در صورتی از دقت کافی در پیش‌بینی مشاهدات برخوردار خواهد بود که خط رگرسیون دارای عرض از مبدأ صفر و شیب برابر یک بوده و بر خط ۱:۱ (y=x) منطبق باشد. مقایسه آماری عرض از مبدأ و شیب خط رگرسیون با خط ۱:۱ به سهولت از طریق آزمون t امکان‌پذیر می‌باشد.

نتایج و بحث

توزیع عملکردهای مشاهده شده

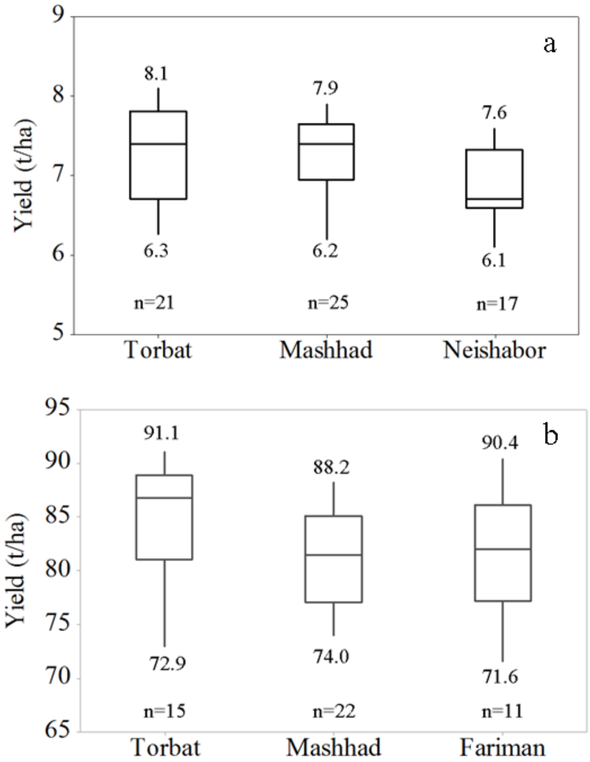
توزیع عملکرد اندازه‌گیری شده گندم در آزمایشات ایستگاهی و مزارع پرمحصول (شکل a7) نشان داد که تفاوت‌های نسبتاً اندکی بین سه منطقه تحت بررسی وجود دارد. در تربت حیدریه ۷۵ درصد داده‌ها در محدوده ۷/۸۰-۶/۷۱ تن در هکتار قرار داشتند و در مشهد دامنه ۷۵ درصد عملکردها بین ۷/۶۵-۶/۹۵ تن در هکتار و در نیشابور بین ۷/۳۳-۶/۶۰ تن در هکتار بود.

این نتایج نشان‌دهنده نزدیک بودن دامنه عملکرد بین سه منطقه است به‌طوری‌که ۹۵ درصد از عملکردهای مشاهده شده گندم در این مناطق بالاتر از ۶ تن در هکتار می‌باشد. بنابراین می‌توان صدک‌های بالای توزیع را به‌عنوان تخمینی از عملکرد پتانسیل در نظر گرفت که بر اساس نتایج ارائه شده در شکل a7 برای مناطق تربت، مشهد و نیشابور به‌ترتیب ۸/۱، ۷/۹ و ۷/۶ تن در هکتار می‌باشد. به روشی مشابه می‌توان دامنه عملکردهای اندازه‌گیری شده را برای چغندرقند نیز ارزیابی کرد، نتایج نشان داد که تقریب عملکرد پتانسیل این محصول در تربت، مشهد و فریمان به‌ترتیب ۹۱، ۸۸ و ۹۰ تن در هکتار می‌باشد (شکل b7).

استفاده از نتایج آزمایشات ایستگاهی تحت مدیریت دقیق و مزارع پرمحصول از جمله روش‌های رایج در تخمین عملکرد پتانسیل محصولات زراعی محسوب می‌شود (Bell and Fischer, 1994; Lobell *et al.*, 2009). البته باید توجه داشت که برآورد آزمایشات ایستگاهی در صورتی قابل استناد خواهد بود که طی چند سال و نیز در مناطق مختلف تکرار شده باشد (Cassman *et al.*, 2003).

بدیهی است که حذف کلیه تنش‌های زنده و غیر زنده از محیط آزمایش در سال‌های متوالی و در چند منطقه برای دستیابی به عملکرد پتانسیل بسیار دشوار می‌باشد. عملکرد مزارع پرمحصول نیز در طی زمان ثابت نخواهد بود به‌علاوه کشاورزان هر سال روش‌های مدیریت از جمله تاریخ کاشت، رقم و میزان مصرف نهاده‌ها را تغییر می‌دهند و این امر باعث خواهد شد تا تغییرات مشاهده شده در عملکرد مزارع پر محصول هم ناشی از شرایط اقلیمی و هم روش مدیریت باشد (Lobell *et al.*, 2009) در نتیجه عملکرد این مزارع نیز معیار دقیقی از عملکرد پتانسیل نمی‌باشد. علی‌رغم این کاستی‌ها محققین از نتایج آزمایشات ایستگاهی و عملکرد مزارع پر محصول و انتخاب صدک‌های بالای توزیع آنها به‌عنوان عملکرد پتانسیل در مطالعات استفاده می‌کنند (van Ittersum *et al*., 2013). به‌علاوه این داده‌ها تنها منبع موجود برای تعیین اعتبار نتایج حاصل از مدل‌های شبیه‌سازی می‌باشند (van Wart *et al*., 2013).

1- Root Mean Squared Error
2- Modeling Efficiency



شکل ۷- توزیع عملکردهای اندازه‌گیری شده گندم (a) و چغندرقند (b) در آزمایشات ایستگاهی و مزارع پر محصول در سه منطقه مختلف، حد پایین و بالای مستطیل به‌ترتیب چارک اول و سوم و خط میان مستطیل میانه را نشان می‌دهد و بر این اساس ۷۵ درصد از داده‌ها در محدوده مستطیل قرار دارند، خطوط خارج شده از مستطیل نشان‌دهنده دامنه ۹۵ درصد می‌باشند.

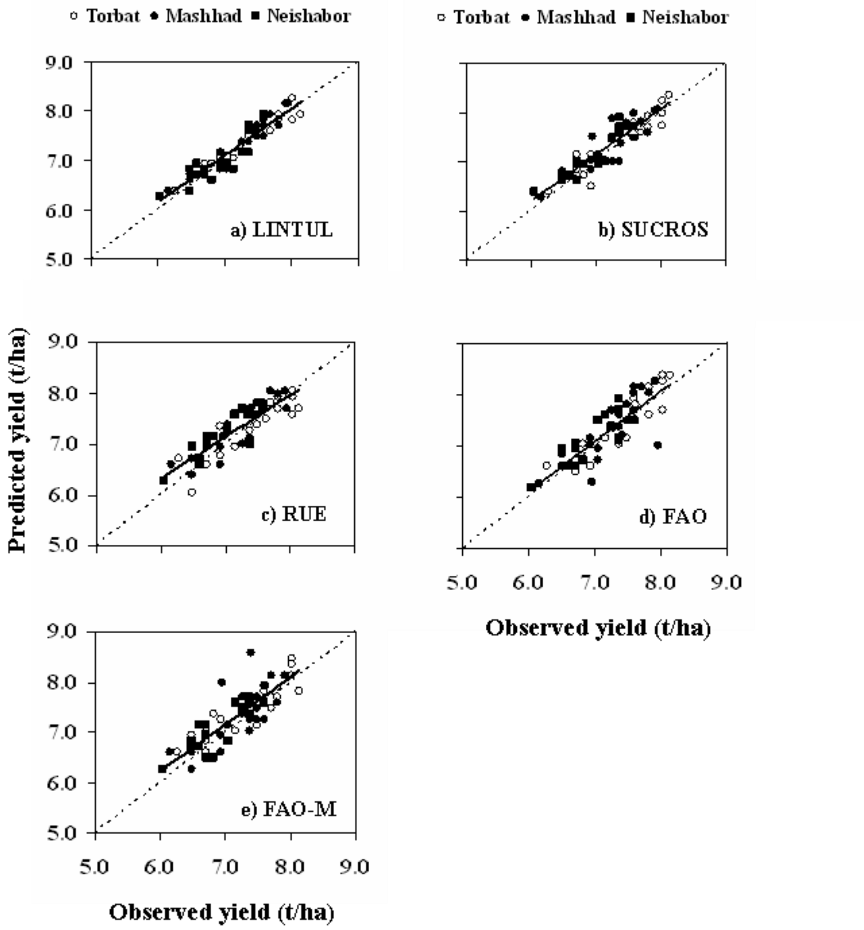
Figure 7- Distribution of measured yields of wheat (a) and sugar beet (b) in experimental plots and high yielding farms in 3 different regions. Lower and upper limits of the box (rectangle) shows the fist and third quartiles and the inner line is median, provided that 75% of the data are covered by the box, outer lines (whiskers) show 95% interval.

تعیین اعتبار روش‌ها

پیش‌بینی عملکرد گندم: در شکل ۸ نتایج مقایسه عملکردهای پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده گندم در سه منطقه از استان خراسان و در جدول ۲ شاخص‌های آماری مربوط به این مقایسات ارائه شده است. میانگین عملکرد مشاهده شده معادل ۷/۱۸ تن در هکتار بود و ۵ روش تحت بررسی عملکرد بالقوه گندم را در دامنه ۶/۹۲ تا ۷/۶۳ تن در هکتار پیش‌بینی کردند در نتیجه خطای پیش‌بینی نسبت به میانگین مشاهدات بین ۰/۳۸- تا ۰/۴۲+ تن در هکتار قرار داشت.

بر اساس شاخص‌های آماری مورد استفاده در تعیین اعتبار روش‌ها، کمترین مقدار RMSE مربوط به مدل‌های شبیه‌سازی بود و در مورد روش‌های RUE، FAO و FAO-M مقدار $RMSE_n$ به‌ترتیب ۷/۱۱، ۹/۲ و ۱۰/۱۶ درصد به‌دست آمد (جدول ۲).

این مقادیر در محدوده‌ای قرار دارند که قابلیت مطلوب روش‌های ساده را در پیش‌بینی عملکرد پتانسیل گندم تأیید می‌کند. البته درصد خطای پیش‌بینی روش‌های ساده بین ۲/۵ تا ۶ درصد بیشتر از مقدار این خطا در مدل‌های LINTUL و SUCROS بود. کارایی مدل‌سازی نیز در روش‌های ساده کمتر از مدل‌های پیچیده شبیه‌سازی بود با این وجود کلیه مقادیر به‌دست آمده برای ME مثبت و بیشتر از ۰/۶ بود و تنها در روش FAO-M به کمترین مقدار یعنی ۰/۴۷ رسید. نتایج آنالیز رگرسیون بین عملکردهای مشاهده شده و پیش‌بینی شده نیز نشان داد که در هر ۵ روش تحت بررسی عرض از مبدأ و شیب خط رگرسیون تفاوت معنی‌داری با خط ۱:۱ نداشت و این روش‌ها بین ۸۸ تا ۶۷ درصد از تغییرات موجود در عملکردهای مشاهده شده را توصیف کردند (جدول ۲). بر اساس این نتایج روش‌های RUE و FAO در مقایسه با روش FAO-M به‌طور نسبی از قابلیت بالاتری برای پیش‌بینی عملکرد پتانسیل گندم برخوردار بودند.



شکل ۸- مقایسه عملکرد مشاهده شده گندم در شهرستان‌های تربت حیدریه، مشهد و نیشابور و عملکرد پتانسیل پیش‌بینی شده به‌وسیله ۵ روش شامل مدل SUCROS، مدل LINTUL، روش (RUE)، روش فائو (FAO)، روش فائو تغییریافته (FAO-M) خطوط توپر و منقطع به‌ترتیب خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی و خط ۱:۱ می‌باشند.

Figure 8- Comparison of observed wheat yields in Torbat, Mashhad and Neishabor cities with predicted potential yield using 5 methods: SUCROS model, LINTUL model, RUE method, FAO method and FAO modified (FAO-M) method. Regression (solid) and 1:1 (broken) lines are also shown.

پیش‌بینی عملکرد چغندرقند: میانگین مشاهده شده عملکرد چغندرقند ۸۲/۵ تا در هکتار بود و مقادیر عملکرد بالقوه توسط ۵ روش تحت بررسی بین ۸۰/۹۱ تا ۸۴/۰۱ تن در هکتار پیش‌بینی شد. نتایج تعیین اعتبار (شکل ۹) نشان می‌دهد که روش‌های ساده مورد استفاده در این مطالعه در مقایسه با مدل‌های شبیه‌سازی عملکرد بالقوه چغندرقند را با دقت خوبی برآورد کردند. میزان اریبی در هیچ‌یک از روش‌های تحت بررسی از ۱/۹۱ تن در هکتار تجاوز نکرد (جدول ۳) و در نتیجه حداکثر مقدار مطلق خطا[1] (نسبت اریبی به میانگین مشاهدات) ۲/۳ درصد بود. بالاترین مقادیر $RMSE_n$ معادل ۱۱/۰۳ و ۱۰/۳ درصد به‌ترتیب مربوط به پیش‌بینی روش FAO و FAO-M بود و کمترین مقدار این شاخص در پیش‌بینی‌های مدل‌های شبیه‌سازی به‌دست آمد (جدول ۳). کارآیی مدل‌سازی (ME) نیز بین سه روش ساده تحت بررسی قابل قبول و بین ۰/۵۴ تا ۰/۶۰ قرار داشت. به‌علاوه شیب خط رگرسیون بین عملکردهای مشاهده شده و پیش‌بینی شده چغندرقند در هیچ‌یک از روش‌ها تفاوت معنی‌داری با شیب خط ۱:۱ نداشت و ضریب تبیین (R^2) خط رگرسیون نیز بین ۰/۶۰ تا ۰/۷۸ به‌دست آمد (جدول ۳).

همان‌گونه که انتظار می‌رفت مدل‌های شبیه‌سازی واسنجی شده توانایی بسیار بالایی در پیش‌بینی عملکرد پتانسیل دو محصول تحت بررسی داشتند. در عین حال برآوردهای حاصل از سه روش ساده به‌ویژه روش‌های RUE و FAO نیز بر اساس شاخص‌های آماری

1- Absolute error

قابل قبـول بـود. البتـه ارزیـابی آمـاری نتـایج حـاکی از آن بـود کـه روش‌های ساده محاسباتی نیز از قابلیت خوبی برای پیش‌بینی عملکرد پتانسیل برخوردارند.

باید توجه داشت که روش‌های ساده مورد استفاده در این مطالعـه تولید ماده خشک را بر اساس میـانگین ماهانـه داده‌هـای هواشناسـی برآورد می‌کنند در حالی‌که مدل‌های شبیه‌سازی برای تخمین عملکرد بـه داده‌هـای روزانـه نیـار دارنـد. نـان هبـل (Nonhebel, 1994) و سلطانی و همکاران (Soltani *et al.*, 2004) نشان دادند کـه اجـرای مدل‌های شبیه‌سازی بر اساس داده‌های ماهانه باعث خواهد شـد کـه این مدل‌ها عملکرد را بیشتر از مقادیر انـدازه‌گیـری شـده پـیش‌بینـی کنند.

جدول ۲- شاخص‌های آماری جهت مقایسه ۵ روش استفاده شده برای برآورد عملکرد گندم در شرایط پتانسیل، O میانگین مشاهدات، P میانگین پیش‌بینی‌ها، MB میانگین اریبی، RMSE جذر میانگین مربعات خطا، $RMSE_n$ جذر میانگین مربعات خطا نسبت به میانگین مشاهدات و ME کارآیی مدل‌سازی می‌باشند. a و b به‌ترتیب عرض از مبدأ و شیب خط رگرسیون بین عملکردهای مشاهده شده و پیش‌بینی شده و R^2 ضریب تبیین معادله است.

Table 2- Statistical measures for comparison between 5 methods used for estimation of potential wheat yield, mean observed yields (O), mean predicted yields (P), MB mean bias, RMSE root mean square error, $RMSE_n$ ratio of root mean square error to mean-O, ME modeling efficiency. a, b show intercept and slope of the regression line between observed and predicted yields and R^2 is the coefficient of determination.

	LINTUL	SUCROS	RUE	FAO	FAO-M
Mean-O (t ha^{-1})	7.18	7.18	7.18	7.18	7.18
Mean-P (t ha^{-1})	7.26	7.30	7.29	7.27	7.33
MB (t ha^{-1})	-0.08	-0.12	-0.12	-0.09	-0.16
RMSE (t ha^{-1})	0.19	0.25	0.28	0.31	0.37
$RMSE_n$ (%)	2.72	3.49	3.91	4.39	5.15
ME	0.85	0.76	0.70	0.62	0.47
a	0.49	0.57	1.41	0.24	0.6
b	0.94	0.93	0.81	0.97	0.93
R^2	0.88	0.82	0.75	0.73	0.67

مقادیر a و b در هیچ‌یک از روش‌ها تفاوت معنی‌داری با عرض از مبدأ و شیب خط ۱:۱ (Y=X) ندارد (P<۰/۰۵)

In all methods the values of a and b are not significantly different from the intercept (a=0) or slope (b=1) of the 1:1 line (P<0.05).

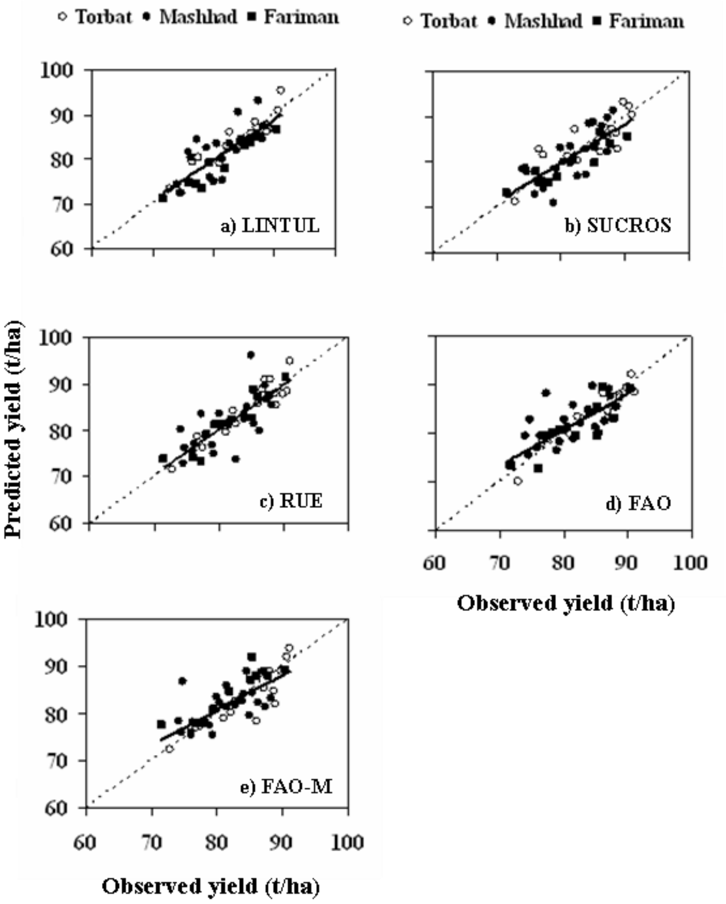
جدول ۳- شاخص‌های آماری جهت مقایسه ۵ روش استفاده شده برای برآورد عملکرد چغندرقند در شرایط پتانسیل، O میانگین مشاهدات، P میانگین پیش‌بینی‌ها، MB میانگین اریبی، RMSE جذر میانگین مربعات خطا، $RMSE_n$ جذر میانگین مربعات خطا نسبت به میانگین مشاهدات و ME کارآیی مدل‌سازی می‌باشند. a و b به‌ترتیب عرض از مبدأ و شیب خط رگرسیون بین عملکردهای مشاهده شده و پیش‌بینی شده و R^2 ضریب تبیین معادله است.

Table 4- Statistical measures for comparison between 5 methods used for estimation of potential sugar beet yield, mean observed yields (O),mean predicted yields (P), MB mean bias, RMSE root mean square error, $RMSE_n$ ratio of root mean square error to mean-O, ME modeling efficiency. a, b show intercept and slope of the regression line between observed and predicted yields and R^2 is the coefficient of determination.

	LINTUL	SUCROS	RUE	FAO	FAO-M
Mean-O (t ha^{-1})	82.50	82.50	82.50	82.50	82.50
Mean-P (t ha^{-1})	82.09	81.91	82.50	82.56	82.55
MB (t ha^{-1})	0.40	0.59	-0.01	-0.06	-0.05
RMSE (t ha^{-1})	3.14	3.43	3.28	3.29	3.54
$RMSE_n$ (%)	3.80	4.16	3.98	3.99	4.29
ME	0.64	0.57	0.60	0.60	0.54
a	7.25	10.97	3.59	20.89	20.77
b	0.91	0.86	0.95	0.74	0.75
R^2	0.7	0.64	0.69	0.62	0.58

مقادیر a و b در هیچ‌یک از روش‌ها تفاوت معنی‌داری با عرض از مبداء و شیب خط ۱:۱ (Y=X) ندارد (P<۰/۰۵)

In all methods the values of a and b are not significantly different from the intercept (a=0) or slope (b=1) of the 1:1 line (P<0.05).

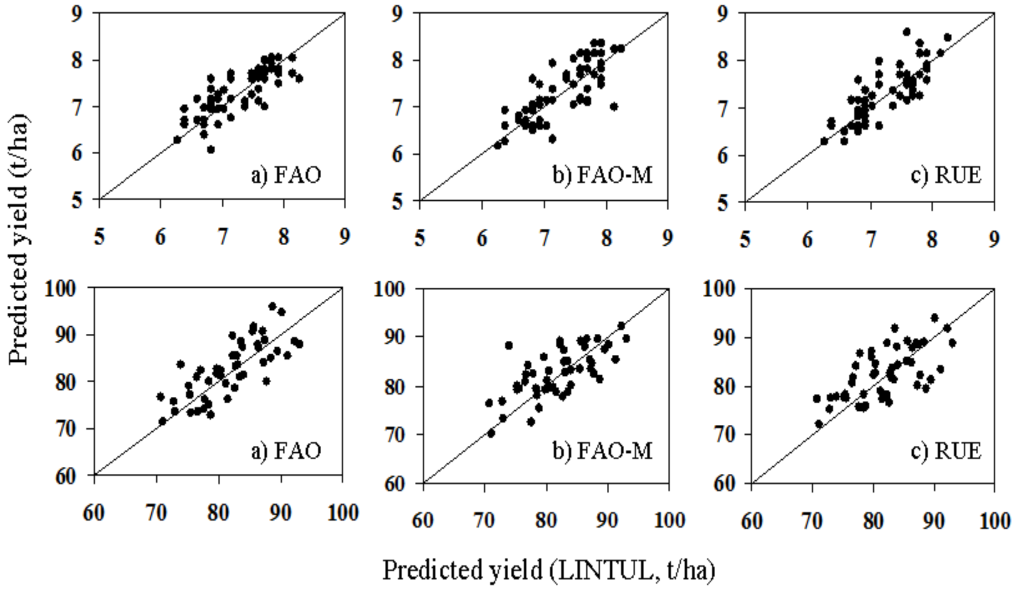


شکل ۹- مقایسه عملکرد مشاهده شده چغندرقند در شهرستان‌های تربت حیدریه، مشهد و نیشابور و عملکرد پتانسیل پیش‌بینی شده به‌وسیله ۵ روش شامل مدل SUCROS، مدل LINTUL، روش (RUE)، روش فائو (FAO)، روش فائو تغییریافته (FAO-M) خطوط توپر و منقطع به‌ترتیب خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی و خط ۱:۱ می‌باشند.

Figure 9- Comparison of observed sugar beet yields in Torbat, Mashhad and Neishabor cities with predicted potential yield using 5 methods: SUCROS model, LINTUL model, RUE method, FAO method and FAO modified (FAO-M) method. Regression (solid) and 1:1 (broken) lines are also shown.

از سوی دیگر پیش‌بینی مدل‌های شبیه‌سازی بر مبنای میانگین‌های ماهانه داده‌های هواشناسی در بسیاری از مطالعات در مقیاس منطقه‌ای، ملی و حتی جهانی قابل قبول بوده است (van Bussel *et al.*, 2011; Deryng *et al.*, 2011; Neumann *et al.*, 2010). بروکس و همکاران (Brooks *et al.*, 2001) نوع خلاصه شده‌ای از مدل Sirius را برای شبیه‌سازی عملکرد گندم در شرایط پتانسیل ارائه کردند که ماده خشک نهایی را با استفاده از میانگین ماهانه درجه حرارت و تشعشع خورشیدی بر مبنای دو معادله پیش‌بینی می‌کند و نتایج حاصل از این مدل ساده با مدل کامل Sirius قابل مقایسه است. البته فان فارت و همکاران (van Wart *et al.*, 2013) بیان داشتند که میانگین‌های ماهانه، واریانس متغیرهای آب و هوایی در ماه‌های مختلف را نشان نداده و در نتیجه جهت پیش‌بینی عملکرد به‌ویژه در مقیاس‌های بزرگ از دقت کافی برخوردار نمی‌باشند.

با وجودی‌که شبیه‌سازی تولید در شرایط پتانسیل در مقایسه با شرایط محدودیت آب یا نیتروژن ساده به‌نظر می‌رسد ولی مشکلات عمده‌ای در این مسیر وجود دارد (Goudriaan, 1996). پیچیدگی مدل‌های شبیه‌سازی را می‌توان بر اساس تعداد پارامترهای موجود در آنها ارزیابی کرد زیرا مدل‌ها از این نظر بسیار متنوع بوده و در نتیجه داده‌های ورودی مورد نیاز برای اجرای آنها نیز بسته به مدل متفاوت خواهد بود. انتظار عمومی براین است که مدل‌های پیچیده‌تر به دلیل پرداختن به جزئیات مربوط به فرآیندهای رشد و نمو از دقت بیشتری برخوردار باشند ولی در عمل معمولاً مدل‌های ساده عملکرد را به‌مراتب دقیق‌تر از مدل‌های پیچیده برآورد می‌کنند (Jamieson *et al.*, 1998; Brooks and Tobias, 1996; Brooks and Tobias, 1999). خودریان (Goudriaan, 1996) با استفاده از داده‌های آب و هوایی مشابه قابلیت ۱۲ مدل را در پیش‌بینی عملکرد پتانسیل گندم در محیط‌های مختلف مورد ارزیابی قرار داد.



شکل ۱۰- تعیین اعتبار عملکرد پیش‌بینی شده توسط روش‌های FAO، FAO-M و RUE در مقابل عملکرد پیش‌بینی شده گندم (a، b و c) و چغندرقند (d، e و f) توسط مدل شبیه‌سازی LINTUL، در شکل عملکردهای مربوط به سه منطقه تحت بررسی تفکیک نشده‌اند.

Figure 10- Cross validation of the predicted yield of wheat (a, b and c) and sugar beet (d, e, and f) by using FAO, FAO-M and RUE methods against predicted yield using LINTUL simulation model, data from 3 regions are not separated.

نتایج نشان داد که عملکرد پیش‌بینی شده توسط مدل‌های بسیار پیچیده تا نسبتاً ساده به‌ترتیب در دامنه‌ای بین ۴/۲ تا ۱۲/۵ تن در هکتار قرار داشت در حالی‌که میانگین عملکرد اندازه‌گیری شده در حدود ۱۲ تن در هکتار بود. وی نتیجه‌گیری کرد مدل‌های پیچیده‌ای که از نظر ساختاری برای شبیه‌سازی عملکرد در شرایط محدودیت آب و عناصر غذایی طراحی شده‌اند پیش‌بینی ضعیف‌تری از عملکرد پتانسیل به‌دست خواهند داد بنابراین استفاده از این مدل‌ها مستلزم واسنجی و تعیین اعتبار آنها بر اساس آزمایشات دقیق مزرعه‌ای می‌باشد.

تعیین اعتبار متقابل[1]

ارزیابی اعتبار مدل‌ها (شکل‌های ۸ و ۹) قابلیت آنها را در پیش‌بینی مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد ولی در این نوع ارزیابی قدرت مدل‌ها به‌طور مستقیم با هم مقایسه نمی‌شود. تعیین اعتبار متقابل روش مطمئن‌تری برای مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده به‌وسیله دو مدل مختلف است. در شکل ۱۰ نتایج پیش‌بینی عملکرد پتانسیل توسط مدل LINTUL با روش‌های ساده و برای گندم و چغندرقند مقایسه شده‌اند. پیش‌بینی روش‌های ساده از عملکرد هر دو محصول انطباق قابل قبولی با مدل شبیه‌سازی داشت. در مورد گندم ضریب همبستگی بین نتایج مدل با روش‌های FAO (شکل a10)، FAO-M (شکل b10) و RUE (شکل c10) به‌ترتیب ۰/۸۰، ۰/۷۹ و ۰/۷۴ و در مورد چغندرقند (شکل‌های d10، e10 و f10) به‌ترتیب ۰/۷۶، ۰/۶۸ و ۰/۶۶ بود که همگی به لحاظ آماری معنی‌دار هستند. این نتایج نشان می‌دهد که روش‌های ساده محاسباتی جایگزین مطمئنی برای مدل‌های پیچیده شبیه‌سازی جهت پیش‌بینی عملکرد پتانسیل می‌باشند.

باوجودی‌که مدل‌های خلاصه شده اغلب در پیش‌بینی عملکرد در مقیاس منطقه‌ای موفق عمل کرده‌اند ولی این تردید وجود دارد که ممکن است به دلیل ساده‌سازی، فرآیندهای مهمی از سیستم حذف شده باشند (Brooks and Tobias, 1996). تعیین اعتبار متقابل روشی رایج برای مقایسه یک مدل جدید با مدلی دیگر (مدل مرجع) است (Gommez, 2000) به این ترتیب با ارزیابی همبستگی بین نتایج مدل ساده شده و مدل مرجع (مدل پیچیده) می‌توان قابلیت مدل ساده شده را مورد آزمون قرار داد. بروکس و همکاران (Brooks *et al.*, 2001) با استفاده از این روش قابلیت مدل خلاصه شده رشد گندم را با یک مدل کامل بر مبنای ضریب همبستگی بین پیش‌بینی دو مدل مورد مقایسه قرار دادند. البته باید توجه داشت که این روش کاربردهای دیگری نیز در پژوهش‌های مدل‌سازی دارد. برای مثال تعیین اعتبار متقابل به روش "حذف یک گروه[2]" (Efron, and

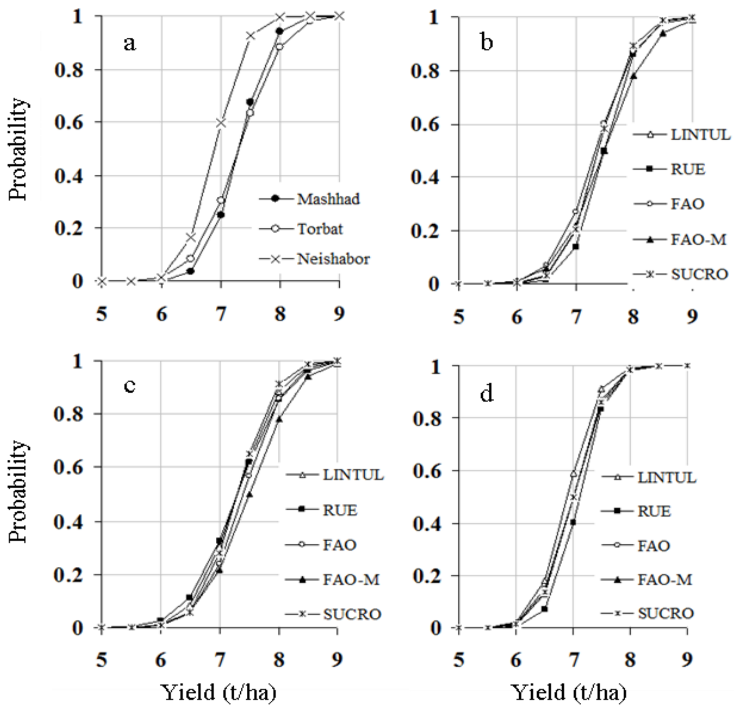
1- Cross validation

2- Leave-one-out (LOO)

Gong, 1983) برای واسنجی و تعیین اعتبار مدل‌ها در شرایطی که تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده اندک باشد بسیار مفید خواهد بود.

توزیع احتمال عملکرد

عملکرد گندم: بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده توزیع احتمالات عملکرد در مشهد و تربت تقریباً مشابه و با نیشابور متفاوت بود (شکل a11). چنانچه صدک‌های بالای عملکرد مشاهده شده در مزارع پرمحصول و آزمایشات ایستگاهی به‌عنوان پتانسیل منطقه در نظر گرفته شوند، عملکرد پتانسیل در هر سه منطقه تحت بررسی بالاتر از ۷ تن در هکتار و با احتمال ۹۰ درصد در نیشابور، مشهد و تربت به‌ترتیب ۷/۵، ۷/۸ و ۸/۲ تن در هکتار می‌باشد (شکل a11). مدل‌های شبیه‌سازی و روش‌های ساده مورد استفاده در این تحقیق احتمالات مشابهی را برای عملکرد پتانسیل گندم در مناطق تحت بررسی پیش‌بینی کردند.

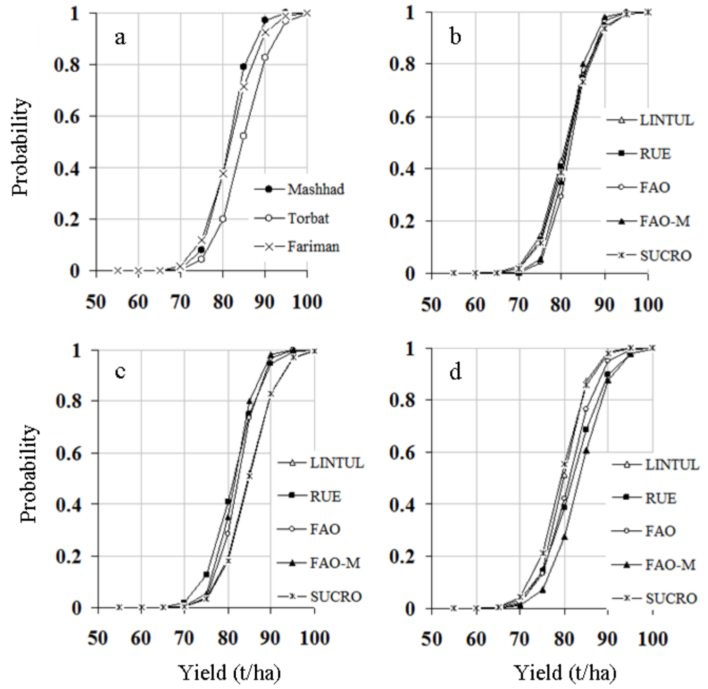


شکل ۱۱- احتمال تجمعی عملکردهای مشاهده شده گندم در سه منطقه تحت بررسی (a) و احتمال تجمعی عملکردهای پیش‌بینی شده به‌وسیله ۵ روش مختلف در تربت حیدریه (b)، مشهد (c) و نیشابور (d).

Figure 11- Cumulative probability of observed yields of wheat in 3 studied regions (a) and cumulative probability of predicted yields using 5 different methods for Torbat (b), Mashhad (c) and Neishabor (d).

در تربت (شکل b11) عملکرد پتانسیل گندم با احتمال ۹۵ درصد بین ۸/۵ تا ۸/۸ تن در هکتار برآورد شد در حالی‌که این عملکرد برای مشهد (شکل c11) با احتمال ۹۵ درصد ۸/۱ تا ۸/۴ تن در هکتار و برای نیشابور (شکل a11) در همین سطح احتمال ۷/۶ تا ۷/۹ تن در هکتار به‌دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که عملکرد پتانسیل پیش‌بینی شده برای مناطق تحت بررسی بین ۰/۵ تا ۰/۸تن در هکتار بیشتر از حداکثر عملکرد برآورد شده بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. به‌علاوه احتمالات به‌دست آمده برای عملکرد پتانسیل به‌وسیله روش‌های ساده محاسباتی انطباق قابل قبولی با مدل‌های شبیه‌سازی دارد.

عملکرد چغندرقند: توزیع احتمال عملکرد چغندرقند بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در مشهد و فریمان مشابه بود و در تربت تا حدودی به سمت راست کشیده شد که نشان‌دهنده بالاتر بودن عملکرد در این منطقه می‌باشد (شکل a12). به این ترتیب بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده عملکرد پتانسیل چغندرقند با احتمال ۹۵ درصد در تربت، مشهد و فریمان به‌ترتیب ۸۲، ۸۴ و ۹۲ تن در هکتار برآورد شد (شکل a12). مشابه گندم احتمالات عملکرد پتانسیل پیش‌بینی شده چغندر توسط مدل‌های شبیه‌سازی و روش‌های ساده بیشتر از مشاهدات بود و با احتمال ۹۵ درصد برای تربت بین ۹۲ تا ۹۷ تن در هکتار (شکل b12) در مشهد بین ۸۵ تا ۹۰ تن در هکتار (شکل c12) و در فریمان ۸۷ تا ۹۲ تن در هکتار به‌دست آمد (شکل d12).



شکل ۱۲- احتمال تجمعی عملکردهای مشاهده شده چغندرقند در سه منطقه تحت بررسی (a) و احتمال تجمعی عملکردهای پیش‌بینی شده به‌وسیله ۵ روش محتلف در تربت حیدریه (b)، مشهد (c) و فریمان (d)

Figure 11- Cumulative probability of observed yields of sugar beet in 3 studied regions (a) and cumulative probability of predicted yields using 5 different methods for Torbat (b), Mashhad (c) and Fariman (d).

نتایج این پژوهش نشان داد که مدل‌های خلاصه شده از نظر قدرت پیش‌بینی، در تعیین اعتبار متقابل و در برآورد احتمالات عملکرد محصولات تحت بررسی در مقیاس منطقه‌ای در مقایسه با مدل‌های پیچیده رشد از دقت قابل قبولی برخوردارند و به نظر می‌رسد که این امر تا حد زیادی ناشی از مقیاس مطالعه است. ویت و همکاران (Wit *et al*., 2005) با بررسی تأثیر مقیاس در قدرت پیش‌بینی مدل‌ها بیان داشتند که مدل‌های رشدی که برای شبیه‌سازی در مقیاس مزرعه ساخته می‌شوند معمولاً در مقیاس منطقه‌ای و ملی دقت خوبی ندارند. این امر عمدتاً به دلیل زیاد بودن تعداد پارامترهای تعریف شده در این مدل‌هاست. برای مثال مدل‌های SUCROS و LINTUL که در تحقیق حاضر به‌کار رفته‌اند به‌ترتیب دارای ۱۱۴ و ۵۶ پارامتر گیاهی بوده و مدل WOFOST (Boogaard *et al*.,1998) که بر پایه SUCROS ساخته شده بسته به گونه زراعی تا ۱۵۴ پارامتر گیاهی دارد. بدیهی ست که تعیین این پارامترها در مرحله واسنجی مدل مستلزم دسترسی به داده‌های دقیق آزمایشی است و در غیر این‌صورت پیش‌بینی عملکرد از اعتبار کافی برخوردار نخواهد بود (Kropff *et al*., 2001). یادآوری می‌شود که بالا بودن دقت پیش‌بینی مدل‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر به این دلیل است که مدل‌ها قبلاً بر اساس داده‌های آزمایشی واسنجی شده‌اند.

باید توجه داشت که با بزرگ شدن مقیاس مطالعه عوامل مؤثر بر یک فرآیند مشخص تغییر خواهند کرد (Viglizzo *et al*., 2004). برای مثال در مقیاس کرت آزمایشی تغییرات عوامل محیطی به دلیل کوچک بودن مقیاس اندک است و فرآیندی نظیر تبخیر و تعرق علاوه بر متغیرهای آب و هوایی به‌وسیله خصوصیات گیاهی مانند عمق توسعه ریشه، هدایت روزنه‌ای و هدایت هیدرولیکی خاک کنترل می‌شود در حالی‌که همین فرآیند در مقیاس منطقه‌ای از خصوصیات گیاهی مستقل بوده و تابع درجه حرارت و تشعشع است (Gardner, 1998). بر این اساس دقت مدل‌های شبیه‌سازی که برای پیش‌بینی عملکرد در مقیاس کوچک (کرت تا مزرعه) ساخته شده‌اند در گرو تعیین دقیق پارامترهای گیاهی تعریف شده در مدل است. بدیهی است که تعیین این پارامترها در مقیاس منطقه‌ای دشوار خواهد بود و در نتیجه دقت پیش‌بینی کاهش می‌یابد (De Wit *et al*., 2005). بنابراین در انتخاب مدل مناسب برای پیش‌بینی عملکرد علاوه بر میزان دسترسی به داده‌ها مقیاس مطالعه نیز حائز اهمیت است (Kravchenko *et al*., 2000; Batchelor *et al*., 2002). در واقع در بررسی‌هایی که هدف آنها پیش‌بینی عملکرد پتانسیل در مقیاس بزرگ است بسیاری از خروجی‌های حاصل از اجرای مدل‌های پیچیده شبیه‌سازی بی‌استفاده می‌باشند لذا تحت این شرایط مدل‌های ساده‌ای

که هدف مطالعه یعنی پیش‌بینی عملکرد را با دقت قابل قبولی تـأمین کنند ارجحیت خواهند داشت (Brooks *et al*., 2001; Brooks and Tobias, 1999).

نتیجه‌گیری

برآورد عملکرد پتانسیل محصولات زراعی در مطالعات مربوط بـه پهنه‌بندی اگرواکولوژیکی و تجزیه و تحلیل خـلاء عملکـرد ضـروری است و محققین روش‌های مختلفی را برای این منظور ارائه کـرده‌انـد که استفاده از عملکرد انـدازه‌گیـری شـده در آزمایشـات کنتـرل شـده ایستگاهی، عملکـرد مـزارع پرمحصـول و عملکـرد پـیش‌بینـی شـده به‌وسیله مدل‌های شبیه‌سازی از مهمتـرین ایـن روش‌هـا مـی‌باشـند. باوجودی‌که نتایج مدل‌های شبیه‌سازی از دقت بالایی برخوردار اسـت ولی به‌کارگیری آنها مستلزم واسنجی دقیق مدل بر اسـاس داده‌هـای آزمایشی و دسترسی به داده‌های آب و هوایی روزانـه اسـت و در غیـر این‌صورت پیش‌بینی مدل‌ها از دقت کافی برخوردار نخواهد بـود و بـه همین دلیل در چنین شرایطی استفاده از مدل‌های سـاده شـده گزینـه مناسبی محسوب می‌شود. در این تحقیق جزئیات مربوط به سه روش ساده محاسباتی که نوع خلاصه شده‌ای از مدل‌های رشد می‌باشـند و به حداقل داده‌های آب و هوایی نیاز دارند جهت پـیش‌بینـی عملکـرد پتانسیل گندم و چغندرقند ارائه شـد و نتـایج پـیش‌بینـی آنهـا در سـه منطقه از استان خراسان بـا دو مـدل پیچیـده شـبیه‌سـازی کـه قـبلاً واسنجی شده بودند مورد مقایسه قرار گرفت. بر اساس یافته‌های ایـن تحقیق روش‌های ساده به لحاظ آماری قابلیت مطلوبی در پـیش‌بینـی عملکرد دو محصول در مناطق مختلف داشتند و بنابراین مـی‌تـوان از این مدل‌های ساده در شرایط عدم دسترسی به داده‌هـای کامـل آب و هوایی و در اختیار نبودن پارامترهای لازم برای اجرای مدل‌های رشـد به‌عنوان جایگزینی برای مدل‌های پیچیده شبیه‌سازی استفاده کرد.

سپاسگزاری

بودجـه ایـن تحقیـق از محـل اعتبـارات طـرح پژوهـه مـورخ ۱۳۸۷/۰۷/۳۰ توسط معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد تـأمین شده که بدین‌وسیله سپاسگزاری می‌شود.

References

1. Batchelor, W. D., Basso, B., and Paz, J. O. 2002. Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. European Journal of Agronomy 18: 141-158.
2. Bell, M. A., and Fischer, R. A. 1994. Using yield prediction models to assess yield gains: a case study for wheat. Field Crops Research 36: 161-166.
3. Bhatia, V. S., Singh, P., Wani, S. P, Chauhan, G. S., Kesava Rao, A. V. R., Mishra, A. K., and Srinivas, K. 2008. Analysis of potential yields and yield gaps of rain fed soybean in India using CROPGRO-Soybean model. Agricultural and Forest Meteorology 148: 1252-1265.
4. Boogaard, H. L., Van Diepen, C. A., Rouitter, R. P., Cabrera, J. C. M. A., and Van Laar, H. H. 1998. WOFOST 7.1 User guidefor the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 5.1. Techn. Doc. 52, Alterra, WUR, Wageningen, The Netherlands, pp. 144.
5. Boote, K. J., Jones, J. W., and Pickering, N. G. 1996. Potential uses and limitations of crop models. Agronomy Journal 88: 704-716.
6. Brooks, R. J., Semenov, M. A., and Jamieson, P. D. 2001. Simplifying Sirius: sensitivity analysis and development of a meta-model for wheat yield prediction. European Journal of Agronomy 14: 43-60.
7. Brooks, R. J., and Tobias, A. M. 1996. Choosing the best model: Level of detail, complexity and model performance. Mathematical and Computer Modeling 24 (4): 1-14.
8. Brooks, R. J., and Tobias, A. M. 1999. Methods and benefits of simplification in simulation. In: Al-Dabass, D., Cheng, R.C.H. (Eds.), UK Sim 99 Fourth National Conference of the U.K. Simulation Society, 7-9 April 1999. UK Simulation Society, St Catharines College, Cambridge, pp. 88-92.
9. Caldiz, D. O., Haverkort, A. J., and Struik, P. C. 2002. Analysis of a complex crop production system in interdependent agro-ecological zones: a methodological approach for potatoes in Argentina. Agricultural Systems 73: 297-311.
10. Cassman, K. G., Dobermann, A., Walters, D. T., and Yang, H. S. 2003. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. Annal Review of Environmental Resources 28: 315-358.
11. Deryng, D., Sacks, W. J., Barford, C. C., and Ramankutty, N. 2011. Simulating the effects of climate and agricultural management practices on global crop yield. Global Biogeochemical Cycling, 25: 18.
12. De Wit, A. J. W., Boogaard, H. L., and van Deipen, C. A. 2005. Spatial resolution of precipitation and radiation: the effect on regional crop yield forecasts. Agricultural and Forest Meteorology 135: 156-168.
13. Efron, B., and Gong. G. 1983. A leisurely look at the bootstrap, the jackknife, and cross-validation. The American Statistician 37 (1): 36-48.
14. FAO, 1978. Report on the Agro ecological Zones Project. Vol. 1.Methodology and results for Africa. World Soil Resources Report 48/1. FAO, Rome, 158cpp.

15. FAO, 1981. Report on the Agro ecological Zones Project. Vol. 3.Methodology and results for South and Central America. World Soil Resources Report 48/3. FAO, Rome, 251 pp.
16. Gardner, R. H. 1998. Pattern, process and analysis of spatial scales. In: Peterson, D.L., Parker, V.T. (eds.). Ecological Scale: Theory and applications. Columbia State University Press, New York.
17. Gommez, R. 2000. Crop-yield weather modeling. FAO-WMO Roving Seminar, Lecture notes and exercises, FAO, Rome.
18. Goudiraan, J., and van Laar, H. H. 1993. Modeling Crop Growth Processes. Kluwer Academic Press, The Netherlands.
19. Goudriaan, J. 1996. Predicting crop yields under global change. In: Walker, B.H., Steffen, W.L. (Eds.), Global Change and Terrestrial Ecosystems. International Geosphere-Biosphere Programme Book Series 2.CambridgeUniversity Press, Cambridge, UK, pp. 260-274.
20. Hoogenboom, G. 2000. Contribution of agro meteorology to the simulation of crop production and its applications. Agricultural and Forest Meteorology 103: 137-157.
21. Jagtap, S. S., and Jones, J. W. 2002. Adaptation and evaluation of the CROPGRO-soybean model to predict regional yield and production. Agriculture Ecosystems and Environment 93: 73-85.
22. Jamieson, P. D., Porter, J. R., and Wilson, D. R. 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. Fields Crops Research 27: 337-350.
23. Jamieson, P. D., Porter, J. R., Goudriaan, J., Ritchie, J. T., Keulen, H., and van Stol, W. 1998. A comparison of the models AFRCWHEAT2, CERES-Wheat, Sirius, SUCROS2 and SWHEAT with measurements from wheat grown under drought. Field Crops Research 55: 23-44.
24. Kravchenko, A. N., and Bullock, D. G. 2000.Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil. Agronomy Journal, 92: 73-85.
25. Kiniry, J. R., Bean, B., Xie, Y., and Chen, P. 2004. Maize yield potential: critical processes and simulation modeling in a high-yielding environment. Agricultural Systems 82: 45-56.
26. Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Soltani, A., Sharifi, H., and Ghorbani, R. 2006. Effects of climate change on growth criteria and yield of sunflower and chickpea crops in Iran. Climate Research 30: 247-253.
27. Koocheki, A., and Nassiri Mahallati, M. 2016. Effects of climate change on agricultural production of Iran: II. Predicting productivity of field crops and adaptation strategies. Iranian Journal of Field Crops Research 14: 1-20. (in Persian with English abstract).
28. Koocheki, A., and Nassiri Mahallati, M. 2007. Impacts of climate change and CO_2 concentration on wheat yield in Iran and adaptation strategies. Iranian Journal of Field Crops Research 6 (1): 139-153. (in Persian with English abstract).
29. Kropff, M. J. Bouma, J., and Jones, J. W. 2001. Systems approaches for the design of sustainable agro-ecosystems. Agricultural Systems 70: 369-393.
30. Licker, R., Johnston, M., Foley, J. A., Barford, C., Kucharik, C. J., Monfreda, C., and Ramankutty, N. 2010. Mind the gap: how do climate and agricultural management explain the 'yield gap' of croplands around the world? Global Ecological Biogeography 19: 769-782.
31. Loague, K., and Green, R. E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. Journal Contaminant Hydrology 7: 51-73.
32. Lobell, D. B., Cassman, K. G., and Field, C. B. 2009. Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. Annual Review of Environmental Resources 34: 179-204.
33. Mondani, F. 2012. Simulating the effect of climate change on wild oat and sunn pest damage on wheat under Mashhad weather conditions. PhD thesis, Ferdowsi University of Mashhad.
34. Muchow, R. C., and Kropff, M. J. 1997. Assessing the potential yield of tropical crops: role of field experimentation and simulation. In: Kropff, M. J., Teng, P. S., Aggarwal, P. K., Bouma, J., Bouman, B. A. M., Jones, J. W., Van Laar, H.H. (Eds.), Applications of Systems Approaches at the Field Level. Vol. 2. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands, pp. 101-112.
35. Nassiri Mahallati, M., Koocheki, A., and Jahan, M. 2011 .Radiation absorption and use efficiency in relay intercropping and double cropping of winter wheat and maize. Iranian Journal of Field Crops Research 8 (6): 878-890. (in Persian with English abstract).
36. Nassiri Mahallati, M., Koocheki, A. Kamali, G. A., and Shahandeh, H. 2006. Potential impact of climate change on rainfed wheat production in Iran. Archives in Agronomy and Soil Science 52: 113-124.
37. Nassiri Mahallati, M., and Koocheki, A. 2017.Trend analysis of nitrogen use and productivity in cereal production systems of Iran. Journal of Agroecology 9: 360-378. (in Persian with English abstract).
38. Neumann, K., Verberg, P. H., Stehfest, E., and Muller, C. 2010. The yield gap of global grain production: a spatial analysis. Agricultural Systems 103: 316-326.
39. Nonhebel, S. 1997. Harvesting the sun's energy using agro ecosystems. DLO Research Institute for Agrobiology and Soil Fertility, Wageningen, the Netherlands. 96 pp.
40. Nonhebel, S. 1994. The effects of use of average instead of daily weather data in crop growth simulation-models.

Agricultural Systems 44: 377-396.
41. O'Connell, M. G., O'Leary, G. J., Whitfield, D. M., and Connor, D. J. 2004. Interception of photo synthetically active radiation and radiation use efficiency of wheat, field pea and mustard in a semi-arid environment. Field Crops Research 85: 111-124.
42. Parsa, S. 2008. Modeling spatial and temporal variation of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) yield in Khorasan province. PhD thesis. Ferdowsi University of Mashhad.
43. Priya, S., and Shibasaki, R. 2001.National spatial crop yield simulation using GIS-based crop production model. Ecological Modeling 135: 113-129.
44. Richter, G. M., Jaggard, K. W., and Mitchell, R. A. C. 2001. Modeling radiation interception and radiation use efficiency for sugar beet under variable climatic stress. Agricultural and Forest Meteorology 109: 13-25
45. Soltani, A., Khooie, F. R., Ghassemi-Golezani, K., and Moghaddam, M. 2001.A simulation study of chickpea crop response to limited irrigation in a semiarid environment. Agricultural Water Management 49: 225-237.
46. Soltani, A., Meinke, H., De Voil, P. 2004. Assessing linear interpolation to generate daily radiation and temperature data for use in crop simulations. European Journal of Agronomy 21: 133-148.
47. Stehfest, E., Heistermann, M., Priess, J. A., Ojima, D. S., and Alcamo, J. 2007. Simulation of global crop production with the ecosystem model Day Cent. Ecological Modeling 204: 345-361.
48. van Bussel, L. G. J., Müller, C., Van Keulen, H., Ewert, F., and Leffelaar, P. A. 2011. The effect of temporal aggregation of weather input data on crop growth models' results. Agricultural and Forest Meteorology 151: 607-619.
49. van Delden, A. 2001 Yielding ability and weed suppression of potato and wheat under organic nitrogen management. PhD Thesis, WageningenUniversity, TheNetherlands, ISBN 90 5808 519_/8, pp. 197.
50. van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., and Hochman, Z. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance-A review. Field Crops Research 143: 4-17.
51. van Ittersum, M. K., Leffelaar, P. A., van Keulen, H., Kropff, M. J., Bastiaans, L., and Goudriaan, J. 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. European Journal of Agronomy 18: 201-234.
52. van Laar, H. H., Goudriaan, J., and Van Keulen, H. 1997. SUCROS97: Simulation of crop growth for potential andwater-limited production situations. C.T. de Wit Graduate School for Production Ecology and Resource Conservation, Wageningen, The Netherlands, pp. 52.
53. van Wart, J., Kersebaum, Ch., Peng, Sh., Milner, M., and Cassman, K. G. 2013. Estimating crop yield potential at regional to national scales. Field Crops Research 143: 34-43.
54. Viglizzo, E. F., Podomingo, A. J., Castro, M. G., Lertora, F. A., and Bernardos, J. N. 2004. Scale-dependent controls on ecological functions in agroecosystems of Argentina. Agriculture, Ecosystem and Environment 101: 39:51.
55. Versteeg, M. N., and van Keulen, H. 1986. Potential crop production prediction by some simple calculation methods, as compared with computer simulations. Agricultural Systems 19: 249-272.
56. Wilmot, C. J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. Bulletin of American Meteorological Society 64: 1309-1313.
57. Wit, A. J. W., Boogaard, H. L., and Diepen, C. A. 2005. Spatial resolution of precipitation and radiation: the effect on regional crop yield forecasts. Agricultural and Forest Meteorology 135: 156-168.

Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 16, No. 4, Winter. 2019, p. 723-741

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۶، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۷، ص. ۷۴۱-۷۲۳

Yield Monitoring for Wheat and Sugar beet in Khorasan Province: 1- Analysis of Methods for Estimating Potential Yield

M. Nassiri Mahalati[1*]- A. Koocheki[1]

Received: 12-02-2017
Accepted: 10-06-2018

Introduction

Potential production condition is defined as situation where water and nutrients are supplied in ample with no damage from weeds, pests and diseases. Under this situation potential yield (Yp) which is defined by solar radiation, temperature, CO_2 concentration and genotypic characteristics of the crop species could be achieved. Closing the gap between Yp and actual yield (Ya) harvested by farmers is considered as the main challenge of agronomic sciences all around the world. Crop simulation models provide a powerful tool for prediction of Yp at regional and national scales. However, the accuracy of these models is highly dependent on the quality of input data which are usually not fully available even in developed countries. Simplified models designed based on few simple equations may be considered as an alternative where accurate data sets are lacking. In this research, Yp of wheat and sugar beet were estimated using some simple methods and the results were compared with those of complex simulation models under the same climatic and management conditions in Khorasan province, north east of Iran.

Materials and Methods

Potential yields of wheat and sugar beet were estimated by three simple calculation methods including FAO method (FAO, 1981), modified FAO, FAO-M (Versteeg and van Keulen, 1986) and RUE-based method (Nonhebel, 1997) at three different regions (Torbat, Mashhad and Neishabor) in Khorasan province. In these methods total above ground dry matter (DM) is calculated using two equations and Y_p is estimated as the product of DM and harvest index with minimum weather data requirements. In addition, Yp for both crops and at the same locations was predicted using LINTUL and SUCROS simulation models which were previously calibrated for yield estimation of wheat and sugar beet at regional level. The accuracy of predicted potential yields by five methods was compared statistically against the measured yields obtained from the field experiments and high yielding farms at the studied regions.

Results and Discussion

Mean observed yield of wheat over the three studied regions was 7.18 t ha^{-1} and the estimated potential yield in the same regions using two simulation models and three simplified models was ranged between 6.92 and 7.63 t ha^{-1}. Prediction error for the simulation models was 1.39 and for simple methods less than 5% (4.64%). Relative root mean squared error ($RMSE_n$) for the simple methods was higher than that of complex models. However, it was between 7.11 and 10.16 % of the mean measured wheat yield which could be statistically considered as reasonable. Calculated values of modeling efficiency (ME) were positive and higher than 0.60 except for FAO-M method (ME=0.48). Measured sugar beet yield averaged over regions was 82.5 t ha^{-1} and estimated potential yield by different methods was between 89 and 91 t ha^{-1}. Simple calculation methods had lower accuracy in predicting sugar beet yield compared to simulation models but $RMSE_n$of simple methods never exceeded 11.5% showing statistically acceptable prediction. Cross validation indicated significant correlation between the results of three simple methods and that of complex simulation models.

Conclusions

Results of this study showed that potential yields of different crops can be estimated accurately using simple calculation methods with minimum weather data requirements. Such methods may be used as an alternative for agroecological zoning and yield gap analysis at regional level where calibrated simulation models and complete daily weather data sets are not available.

Keywords: Modeling efficiency, Simulation models, Summary models, Yield prediction

1- Professor, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
(*- Corresponding Author Email: mnassiri@um.ac.ir)